

ANÁLISE ENERGÉTICA E EXERGÉTICA DE GERADORES FOTOVOLTAICOS

Suellen Caroline Silva Costa – suellencscosta@gmail.com

Janaína de Oliveira Castro Silva – janainajocs@hotmail.com

Vinícius Veloso- vinivel@live.com

Cristiana Brasil Maia – cristiana@pucminas.br

Lauro de Vilhena Brandão Machado Neto – lvilhena@pucminas.br

Antonia Sônia Alves Cardoso Diniz – asacd@pucminas.br

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Instituto Politécnico da PUC-Minas

Resumo. Os sistemas fotovoltaicos são uma tecnologia de geração de energia que converte a radiação solar em energia elétrica. Devido à preocupação quanto ao uso de fontes não renováveis e finitas para a geração de energia elétrica, os sistemas fotovoltaicos são vistos como uma tecnologia promissora para inserção na matriz elétrica brasileira, por dependerem de um recurso renovável abundante em todo o país: a radiação solar. Neste cenário, surge a necessidade de aprimorar o conhecimento em relação ao funcionamento destes sistemas, no intuito de avaliar o desempenho, visando identificar os fatores que influenciam a eficiência desta tecnologia de geração. Os índices que quantificam o desempenho de sistemas fotovoltaicos são importantes para identificação de perdas ou problemas relacionados ao mau funcionamento destes sistemas. Desta forma, este trabalho apresenta a modelagem para estimativa das eficiências energética e exergética, com base nas condições meteorológicas da localidade e parâmetros elétricos e térmicos de um gerador fotovoltaico. A simulação das eficiências foi realizada para as tecnologias de módulos fotovoltaicos de silício monocristalino, policristalino e amorfo, considerando os dados meteorológicos para a cidade de Belo Horizonte, em Minas Gerais. Os resultados demonstraram que as eficiências energéticas variaram entre 9,89% e 16,39% sendo o módulo de silício monocristalino o mais eficiente e o módulo de menor eficiência o de silício amorfo. As eficiências exergéticas dos módulos monocristalino e policristalino apresentaram eficiências muito próximas, 9,46% e 9,84%, respectivamente, diferença esta justificada pela diferença de áreas. Já o módulo de silício amorfo apresentou eficiência exergética de 3,15%, sendo, portanto o menos eficiente.

Palavras-chave: Sistemas Fotovoltaicos, Módulos Fotovoltaicos, Análise Energética, Análise Exergética.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com Dincer et al. (2010) o declínio do fornecimento de energia fóssil do mundo associado ao aumento no consumo de energia e a tendência contínua de aquecimento global causado pelas emissões de gases de efeito estufa, têm reforçado os esforços de inovação e pesquisa para a implementação de uma economia global baseada em energia renovável. Este tipo de energia vem de três fontes "fundamentais", ou seja, solar, gravitação combinado com o movimento do planeta, e geotérmica. A energia solar pode ser utilizada para diversos fins, entre os quais a geração de energia, pois oferece a possibilidade de fornecer uma parte cada vez mais importante da demanda mundial de energia.

O Brasil apresenta grande interesse quanto à inserção da geração solar fotovoltaica na matriz elétrica brasileira, pois o país apresenta elevados índices de radiação, favorecendo a eficiência do sistema de geração. De acordo com a Associação Brasileira de Indústria Elétrica e Eletrônica, a potência acumulada de sistemas fotovoltaicos aumentou aproximadamente 54% em relação ao ano de 2011. Este aumento pode ser justificado pelos incentivos regulatórios, entre os principais a Resolução Normativa da ANEEL nº 482/12 e a Chamada ANEEL 13/11 que visa incentivar a criação de propostas estratégicas relativas à inserção da geração solar fotovoltaica na matriz energética brasileira. A energia solar que atinge a superfície da Terra pode ser utilizada diretamente de duas maneiras, por conversão direta em eletricidade por meio de energia solar fotovoltaica e por meio de aquecimento, através da utilização de coletores solares para aplicações de aquecimento para baixas temperaturas.

De acordo com Sarhaddi et al. (2010) um sistema fotovoltaico apresenta tempo de retorno de energia entre 10 e 15 anos, dependendo do isolamento e do desempenho do mesmo. Se o desempenho do mesmo pode ser aumentado, o tempo de recuperação de energia pode ser reduzido. Portanto, a avaliação de desempenho é um fator importante. O desempenho depende de parâmetros meteorológicos, operacionais e de projeto, tais como temperatura ambiente, a intensidade da radiação solar, velocidade do vento, temperatura da célula solar, velocidade do ar, tensão de circuito aberto, a corrente de curto-circuito, corrente e tensão no ponto de máxima potência, do comprimento e da largura do módulo, coeficiente global de transferência de calor, entre outros. Ele pode ser avaliado em termos da primeira e segunda lei da termodinâmica. Sua avaliação com base na primeira e segunda lei da termodinâmica é conhecida como eficiência energética e eficiência exergética, respectivamente.

Segundo Dincer (2002) a análise exergética é uma ferramenta para avaliação do impacto ambiental da utilização do recurso energético. A técnica de análise exergética possui aplicação na previsão dos objetivos de uso de fontes de

energia mais eficientes, permitindo a determinação de localizações, tipos, e magnitudes reais de perdas e gastos. Pode ainda ser uma ferramenta de grande valia no estudo da possibilidade de redução da ineficiência em sistemas já existentes. Associadas todas estas funcionalidades, a análise exergética constitui um componente chave na obtenção de um desenvolvimento sustentável. De acordo com Pandey et al. (2013) a análise energética é mais apropriada quando uma análise global é necessária, já a análise exergética é mais apropriada quando o sistema ou um componente individual devem ser analisados qualitativamente.

Joshi et al. (2009) citam que a energia de um sistema fotovoltaico depende principalmente de duas componentes denominadas energia elétrica e energia térmica. A energia elétrica gerada pelo sistema fotovoltaico é também denominada como a exergia elétrica, uma vez que ela está completamente disponível para ser convertida em trabalho. Uma vez que a energia térmica disponível na superfície das células fotovoltaicas não pode ser utilizada para gerar trabalho útil no caso dos sistemas fotovoltaicos, ela passa a constituir perda de calor para o ambiente. A eficiência energética de um sistema fotovoltaico pode ser definida então como uma relação entre a energia gerada pela energia solar total incidente na superfície da célula fotovoltaica.

Sahin et al. (2007) investigaram as características termodinâmicas das células fotovoltaicas, com base nas eficiências energéticas e exergéticas. A eficiência energética encontrada variou entre 7 e 12 % durante a hora do dia, enquanto que a eficiência da exergética variou entre 2 e 8 %. De acordo Xydis (2013) as perdas de exergia, estão relacionadas ao fator de correção da temperatura, devido ao aumento da temperatura do módulo, representando perdas de 1,3% no desempenho do sistema.

Segundo Xydis (2013), o desempenho de um módulo fotovoltaico depende de variáveis meteorológicas como a temperatura, irradiação solar, ângulo de incidência e o tipo de célula fotovoltaica utilizado. A temperatura exerce uma importante influência na eficiência dos módulos e consequentemente de todo o gerador fotovoltaico.

As variáveis meteorológicas mudam significativamente de um ano para o outro, desta forma, a geração de um ano meteorológico típico para representar um longo período de dados é de crucial importância para o setor energético. O ano padrão é um conjunto de dados experimentais que tem como função representar um ano típico para uma determinada localidade, tornando-se representativo para diversos outros anos. O ano meteorológico típico ou ano padrão permite aplicar o conhecimento da meteorologia local nos procedimentos para avaliação, projeto, planejamento e operação de plantas de geração a partir de fontes renováveis.

Desta forma, este trabalho apresenta a análise das eficiências energéticas e exergéticas, com base nas condições meteorológicas da localidade e parâmetros elétricos e térmicos de um gerador fotovoltaico. A simulação das eficiências foi realizada para as tecnologias de módulos fotovoltaicos de silício monocristalino, policristalino e amorfo, considerando os dados da cidade de Belo Horizonte, em Minas Gerais.

2. METODOLOGIA

Os módulos fotovoltaicos são compostos por várias células solares ligadas em série e/ou em paralelo que transformam a energia solar em eletricidade a partir do efeito fotovoltaico. Atualmente existem vários tipos de células constituídas por diferentes materiais, porém a mais utilizada é a de silício por apresentar maior relação eficiência/custo sobre as outras tecnologias de células. As células de silício podem ser de silício cristalino – monocristalino e policristalino – ou de filme fino – silício amorfo. As células de filme fino são atrativas para o mercado de tecnologias de células, pois são compostas por uma fina camada do semicondutor, o que reduz o custo de produção.

As células solares podem ser distinguidas de acordo com o grau de pureza do material que influencia diretamente na eficiência deste dispositivo fotovoltaico. Segundo Green et al. (2012), as células de silício monocristalino podem atingir eficiência de até 25%, devido ao elevado grau de pureza do silício possibilitando alcançar um maior desempenho em relação às outras tecnologias de células. As células de silício policristalino possuem eficiência em torno de 20%, enquanto as células de silício amorfo de filme fino podem chegar a eficiências de aproximadamente 10%. As células de Telureto de Cádmio (CdTe) e de Disseleneto de Cobre-Índio (CIS) também são tecnologias de células de filme fino e possuem eficiências em torno de 16% e 19%, respectivamente.

Este trabalho visa analisar, através da modelagem e simulação das eficiências energética e exergética de três tecnologias de módulos fotovoltaicos, considerando dados meteorológicos horários da cidade de Belo Horizonte, em Minas Gerais. A simulação foi realizada no software Engineering Equation Solver (EES), no qual foram gerados os gráficos utilizados na análise.

As eficiências energéticas e exergética foram estimadas para todas as horas e dias do ano, considerando a variação dos parâmetros meteorológicos e parâmetros dos módulos fotovoltaicos. Os dados meteorológicos utilizados na simulação foram de um ano padrão para Belo Horizonte obtido do projeto Solar and Wind Energy Resource Assessment (SWERA). Para estimar os parâmetros elétricos e térmicos dos módulos fotovoltaicos para diferentes condições de operação é necessário definir os parâmetros em condição de referência, possibilitando estimar a variação destes em relação à temperatura e radiação solar. Para isso, foram considerados na simulação como parâmetros de referência, os dados fornecidos pelos fabricantes dos módulos em condição padrão de teste (Standard Test Conditions – STC). Na Tab. 1 são apresentadas as características elétricas dos módulos fotovoltaicos monocristalino (SP70), policristalino (KC65T) e amorfo (ES-62T).

Tabela 1– Características elétricas dos módulos fotovoltaicos

| | SP70 | KC65T | ES-62T |
|--|-------------|--------------|-------------|
| Potência | 70 W | 65 W | 62 W |
| Tensão de circuito aberto ($V_{oc,ref}$) | 21,4 V | 21,7 V | 21,0 V |
| Corrente de curto-circuito ($I_{sc,ref}$) | 4,7 A | 3,99 A | 5,1 A |
| Tensão no ponto de máxima potência ($V_{m,ref}$) | 16,5 V | 17,4 V | 15,0 V |
| Corrente no ponto de máxima potência ($I_{m,ref}$) | 4,25 A | 3,75 A | 4,1 A |
| Coefficiente de temperatura para corrente de curto-circuito (α) | 0,002 A/°C | 0,00159 A/°C | 0,0051 A/°C |
| Coefficiente de temperatura para tensão de circuito aberto (β) | -0,076 V/°C | -0,0821 V/°C | -0,08 V/°C |
| Condição de temperatura nominal para funcionamento da Célula (NOCT) | 45 °C | 47 °C | 46 °C |
| Temperatura em condição padrão de operação (STC) | 25 °C | 25 °C | 25 °C |
| Largura do módulo | 1,172 m | 0,751 m | 1,258 m |
| Comprimento do módulo | 0,483 m | 0,652 m | 0,793 m |

Fonte: Kyocera (2007), Shell Solar (2002) e Uni-Solar (2005)

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O gerador fotovoltaico é o componente do sistema fotovoltaico responsável por absorver a radiação solar e a converter em energia elétrica, podendo este ser constituído por módulos de diferentes tecnologias. O desempenho dos módulos fotovoltaicos é influenciado por diversos fatores, entre os quais, as condições meteorológicas como a intensidade da radiação solar, a temperatura ambiente e a velocidade do vento.

Para avaliar a variação dos parâmetros elétricos e térmicos e por fim o comportamento referente às eficiências energéticas e exergéticas ao longo de um ano típico dos módulos analisados, foram considerados os dados meteorológicos de um ano padrão para a cidade de Belo Horizonte. Para estimar os parâmetros elétricos e térmicos dos módulos fotovoltaicos foi utilizado o modelo proposto por Chouder et al. (2012) que considera o modelo de um diodo para determinar os parâmetros em diferentes condições de operação através de dados obtidos em uma determinada condição de referência.

A corrente de curto-circuito para uma condição de operação pode ser definida por:

$$I_{sc} = I_{sc,ref} \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) + \alpha (T_c - T_{c,ref}) \quad (1)$$

onde G_{ref} , $I_{sc,ref}$ e $T_{c,ref}$ são a radiação solar, a corrente de curto-circuito e a temperatura do módulo em condição de referência, G e T_c são a radiação solar e a temperatura do módulo em uma determinada condição de operação, e α é o coeficiente de temperatura para a corrente de curto-circuito.

A temperatura do módulo (T_c) pode ser definida a partir dos dados definidos para a condição de operação nominal do módulo, Eq. (2), como proposto por Pandey et al. (2013):

$$T_c = T_a + \left(\frac{TONC - 20 \text{ °C}}{800 \text{ W/m}^2} \right) * G \quad (2)$$

onde TONC é a temperatura de operação nominal do módulo e T_a é a temperatura ambiente.

A tensão de circuito aberto é dada por:

$$V_{oc} = V_{oc,ref} - \beta (T_{c,ref} - T_c) + A_f \ln \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) \quad (3)$$

onde $V_{oc,ref}$ é a tensão de circuito aberto em uma condição de referência, β é o coeficiente de temperatura para a tensão de circuito aberto, e A_f é o fator de idealidade modificado do diodo, definido por:

$$A_f = \frac{n k T_c}{q} \quad (4)$$

onde n é o fator de idealidade do diodo, neste trabalho foi considerado o fator de idealidade de um diodo ideal ($n=1$), k é a constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K), e q é a carga de um elétron ($1,602 \times 10^{-19}$ C).

A corrente e tensão no ponto de potência máxima são definidas por:

$$I_m = I_{m,ref} \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) \quad (5)$$

$$V_m = V_{m,ref} - \beta(T_{c,ref} - T_c) \quad (6)$$

onde $V_{m,ref}$ e $I_{m,ref}$ são a tensão e corrente no ponto de potência máxima para uma condição de referência.

Os parâmetros de referências utilizados nesta modelagem foram retirados dos datasheet disponibilizados pelos fabricantes dos módulos fotovoltaicos avaliados, considerando a condição padrão de teste (*Standard Test Conditions – STC*).

A partir da definição dos parâmetros elétricos dos módulos fotovoltaicos para diferentes condições de operação, é possível avaliar o desempenho destes dispositivos através da avaliação das eficiências de conversão, energética e exergética. Para isso foi utilizado o modelo proposto por Pandey et al. (2013).

A eficiência de conversão energética do módulo é definida como a razão entre a potência máxima para a incidência de radiação solar na superfície do módulo:

$$\eta_{conversão} = \frac{V_m I_m}{G * A} \quad (7)$$

onde A é a área do módulo fotovoltaico.

A eficiência energética pode ser determinada como:

$$\eta_{energética} = \frac{V_{oc} I_{sc}}{G * A} \quad (8)$$

A exergia de saída de módulos fotovoltaicos é dada pelo somatório das exergias elétrica e térmica:

$$Ex_{módulo} = Ex_{elet} + Ex_{term}$$

onde

$$Ex_{elet} = V_{oc} I_{sc} - (V_{oc} I_{sc} - V_m I_m) \quad (9)$$

$$Ex_{term} = \left(1 - \frac{T_a}{T_c} \right) h_{ca} A (T_c - T_a) \quad (10)$$

A eficiência exergética de módulos fotovoltaicos é dada pela razão entre a exergia de saída e a exergia de entrada. A exergia de entrada é proveniente da radiação solar, definida por:

$$Ex_{solar} = \left(1 - \frac{T_a}{T_{sol}} \right) G * A \quad (11)$$

Como o produto dos módulos fotovoltaicos é a geração de energia elétrica, e o calor gerado é rejeitado, a exergia do módulo é definida como sendo a diferença entre as exergias elétrica e térmica. Desta forma a eficiência exergética do módulo fotovoltaico é dada por:

$$\varepsilon = \frac{\text{exergia de saída}}{\text{exergia de entrada}} = \frac{V_m I_m - \left(1 - \frac{T_a}{T_c} \right) h_{ca} A (T_c - T_a)}{\left(1 - \frac{T_a}{T_{sol}} \right) G * A} \quad (12)$$

onde T_{sol} é a temperatura do Sol (5777 K) e $h_{ca} = 5,7 + 3,8v$, que é o coeficiente de transferência de calor e v é a velocidade do vento.

4. RESULTADOS

Para analisar o comportamento das eficiências foram selecionados dois meses do ano, o mês de Janeiro, compreendido no período de verão no hemisfério sul, e Junho, no período do outono. As Fig. 1 e 2 apresentam a radiação solar e a temperatura ambiente do dia 15 de Janeiro e do dia 15 de junho. Em geral o mês de Janeiro apresenta maiores índices de radiação solar e maiores valores de temperatura ambiente, já o mês de Junho, apresenta menores temperaturas e menores índices de radiação solar.

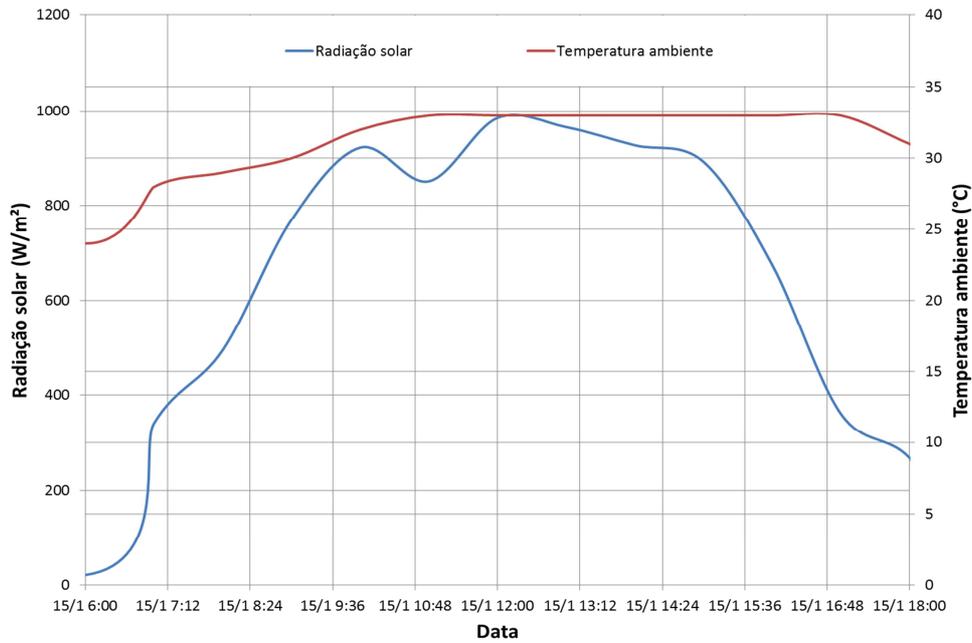


Figura 1 – Condições ambientais para o dia 15 de Janeiro

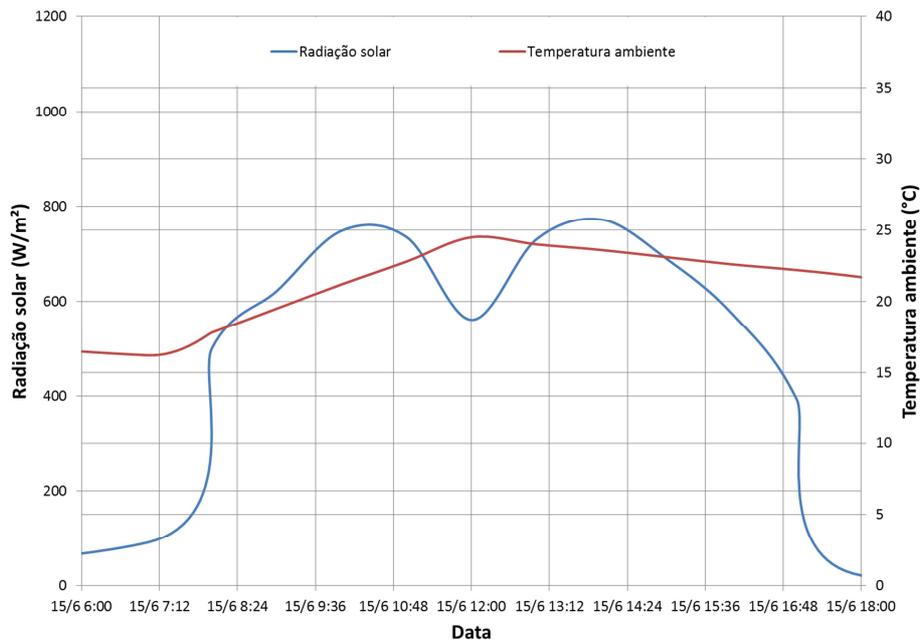


Figura 2 – Condições ambientais para o dia 15 de Junho

As Fig. 3 e 4 mostram o comportamento da eficiência de conversão dos módulos fotovoltaicos. Pode-se observar que o módulo de silício amorfo apresenta menor eficiência de conversão, o que já era esperado devido à composição do silício utilizado neste dispositivo possuir menor grau de pureza. Porém, os resultados mostram que a eficiência de conversão do módulo de silício policristalino é maior do que do monocristalino, o que contradiz o esperado. Este resultado é justificado pela diferença de área dos dispositivos analisados, além disso, outro fator que pode influenciar nestes resultados são os coeficientes de temperatura.

A variação da eficiência ao longo do dia dos meses analisados é justificada pela variante de temperatura ambiente. A eficiência de conversão dos módulos é maior nas primeiras horas do dia, e diminui ao longo do dia pelo aumento da temperatura. A eficiência de conversão foi maior no mês de Janeiro, devido ao elevado índice de radiação, porém não apresentou uma diferença representativa, pois apesar do índice de radiação elevado, a temperatura ambiente também foi alta.

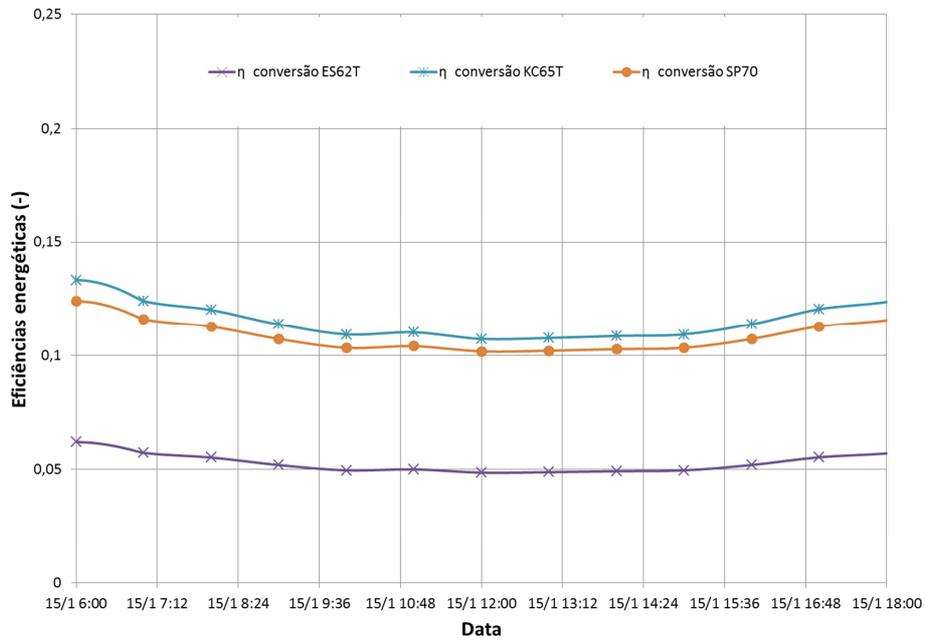


Figura 3 – Eficiências de conversão dos módulos fotovoltaicos para o dia 15 de Janeiro

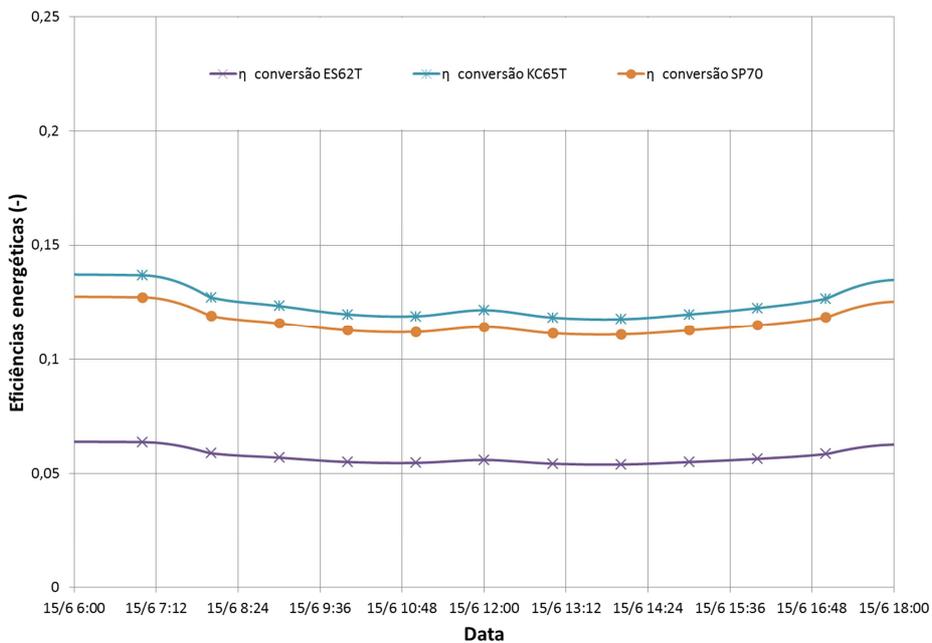


Figura 4 – Eficiências de conversão dos módulos fotovoltaicos para o dia 15 de Junho

Nas Fig. 5 e 6 são apresentadas as exergias para os módulos analisados. Pode-se observar que a exergia solar é maior em relação às componentes da exergia de saída. Isso pode ser justificado devido às perdas de absorção, pois nem toda radiação solar que incide nos módulos fotovoltaicos é absorvida, e pela influência da temperatura, que afeta o desempenho destes dispositivos. O módulo de silício amorfo é o que apresenta maior exergia solar, devido a sua área, seguido do módulo monocristalino e policristalino. A variação da curva das exergias ao longo do dia ocorre devido à variação da radiação solar, sendo que a exergia solar varia com a radiação, temperatura ambiente e temperatura do Sol, e as exergias elétricas e térmicas, variam em relação à radiação e a temperatura ambiente. Como o mês de Janeiro apresenta maiores índices de radiação solar, as exergias foram maiores neste mês comparadas com as do mês de Junho.

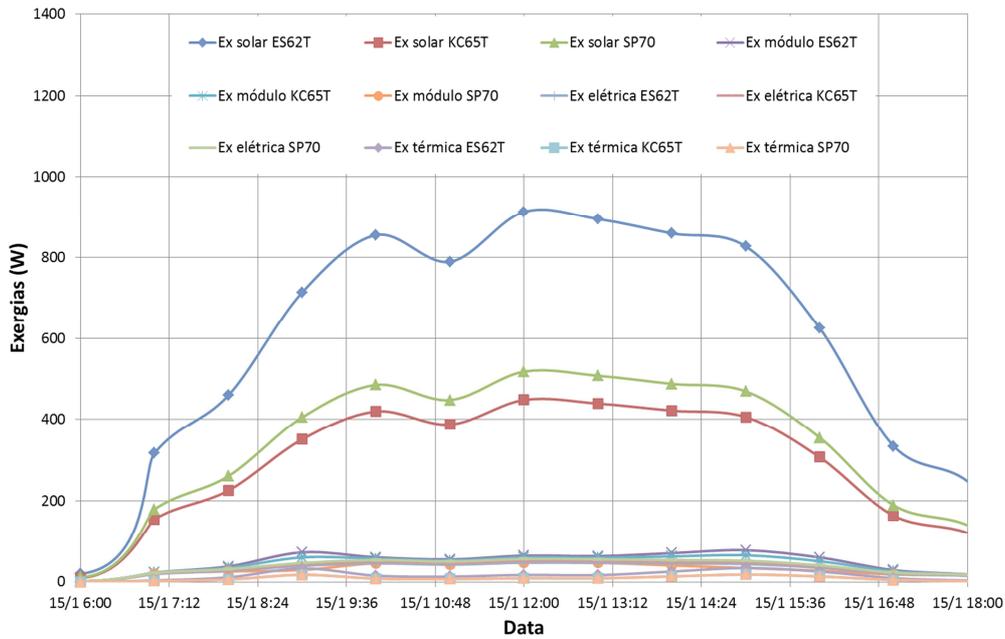


Figura 5 – Exergias para o dia 15 de Janeiro

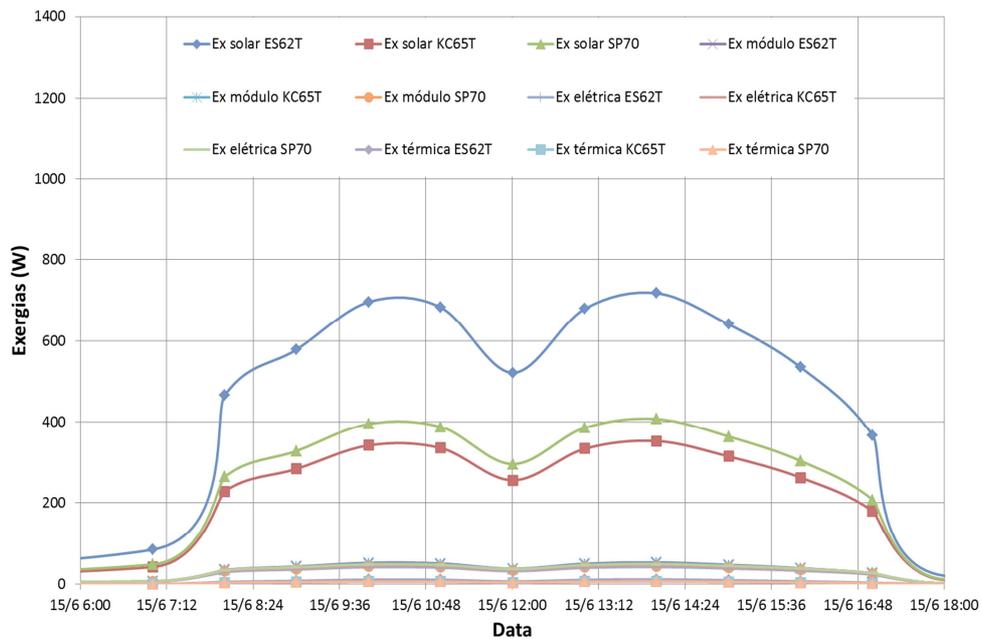


Figura 6 – Exergias para o dia 15 de Junho

As Fig. 7 e 8 apresentam as eficiências energéticas e exergéticas dos módulos fotovoltaicos analisados para o período de Janeiro e para Junho. A eficiência energética do módulo monocristalino foi maior em relação às demais, seguido do módulo policristalino, e o módulo amorfo foi o que apresentou menor eficiência. Em relação a eficiência exergética, os módulos de silício monocristalino e policristalino apresentaram valores semelhantes, seguido do módulo de silício amorfo que apresentou menor eficiência. O comportamento das curvas exergéticas pode ser justificado devido à influência das condições meteorológicas, além de variar devido à velocidade do vento, como pode ser observado nos períodos compreendidos entre 08 às 10 horas, e entre 14 às 16 horas, no mês de Janeiro, onde a velocidade do vento apresentou elevados índices, além da variação da radiação e temperatura ambiente, ocasionando no aumento da exergia térmica, e conseqüentemente redução das eficiências exergéticas dos módulos. Considerando os mesmos parâmetros meteorológicos, os módulos de silício cristalino variaram mais com a elevação da temperatura do que o módulo de silício amorfo.

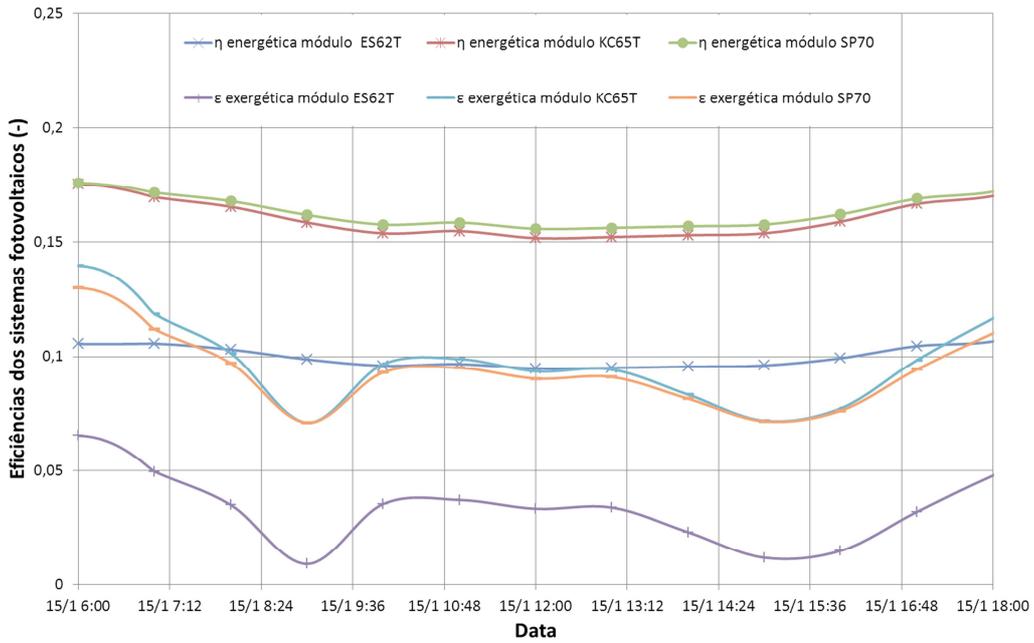


Figura 7 – Eficiências energéticas e exergéticas dos módulos fotovoltaicos para o dia 15 de Janeiro

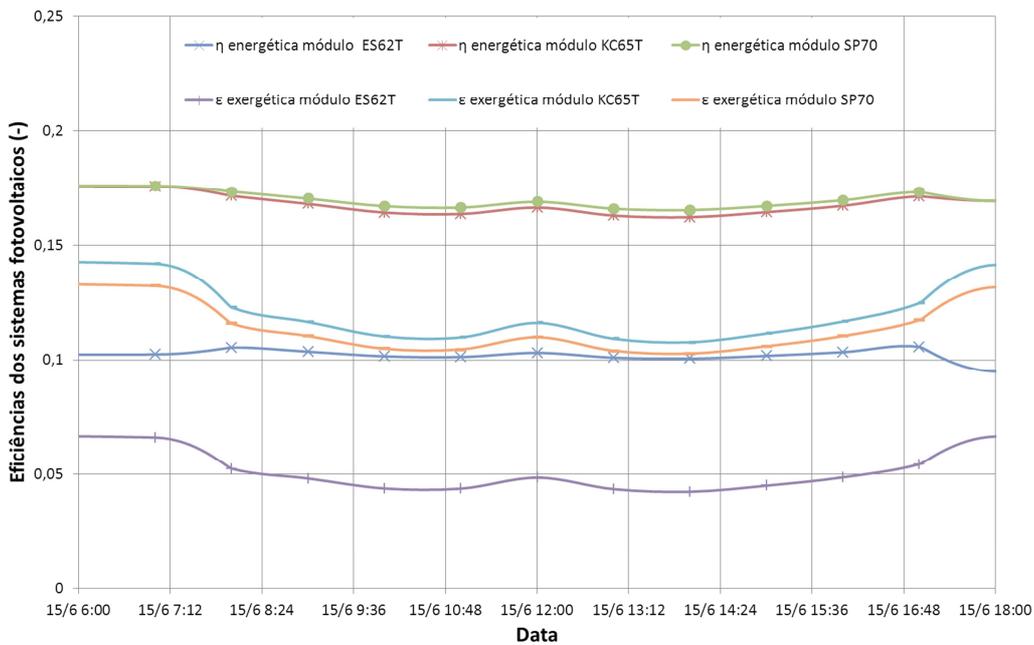


Figura 8 – Eficiências energéticas e exergéticas dos módulos fotovoltaicos para o dia 15 de Junho

Na Fig. 9 são apresentadas as médias mensais da radiação solar e da temperatura para um ano típico, e a Fig. 10 são apresentadas as eficiências energéticas e exergéticas médias mensais para cada módulo fotovoltaico analisado. Pode-se observar que as eficiências energéticas dos módulos sempre serão maiores que as eficiências exergéticas, e a variação das eficiências são diretamente influenciadas pela variação dos parâmetros meteorológicos, como pode ser visto no mês de Junho, em que o índice de incidência da radiação solar é menor, fazendo com que haja um declínio das eficiências energéticas.

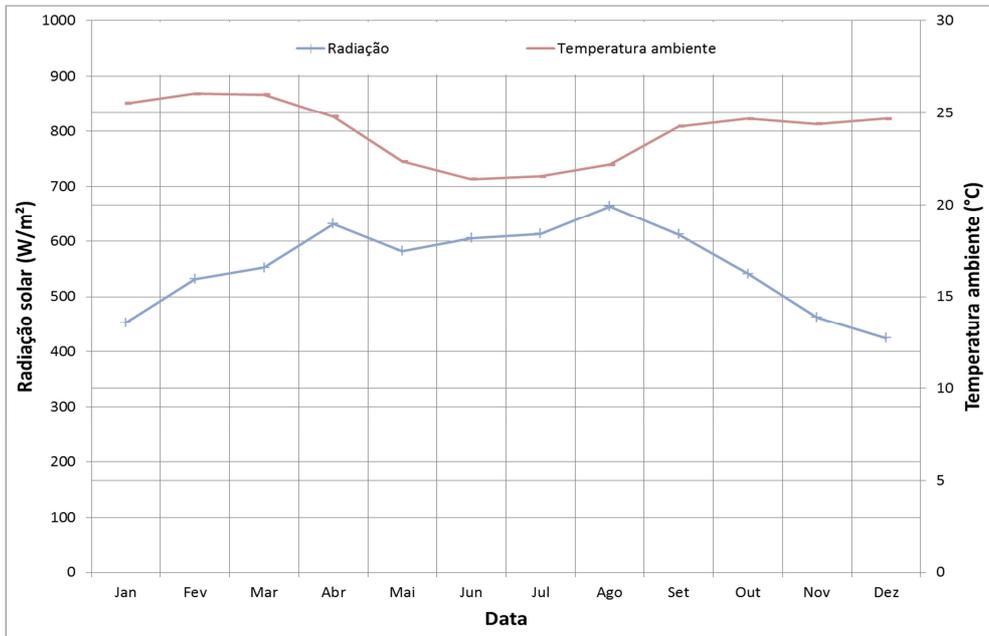


Figura 9 – Condições ambientais médias mensais

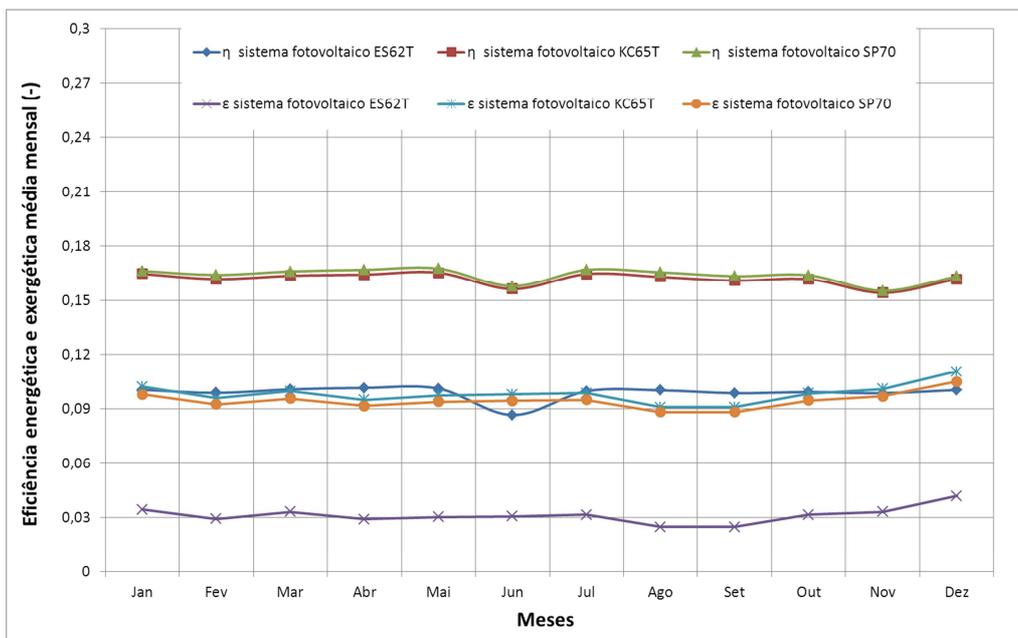


Figura 10 – Eficiências energéticas e exérgicas médias mensais dos módulos fotovoltaicos

5. CONCLUSÃO

Este estudo possibilitou avaliar a resposta de diferentes tipos de módulos de silício mediante a variação dos parâmetros meteorológicos, além de que esta avaliação permitiu identificar as eficiências energéticas e exérgicas destas tecnologias, o que possibilita incentivar propostas para aumentar estes índices, a fim de aumentar o desempenho destes módulos.

O módulo de silício monocristalino, apresentou maior eficiência energética média anual, 16,39%, apesar de mais eficiente energeticamente, é influenciado consideravelmente pela variação das condições meteorológicas, apresentou eficiência exérgica média anual de 9,46%, um pouco menor que a eficiência de segunda lei do módulo policristalino, 9,84%, essa variação pode ser justificada pela diferença de área entre os módulos. O módulo de silício amorfo apresentou menores eficiências que os demais, com eficiência energética média anual de 9,89% e eficiência exérgica de 3,15%, devido à relação potência/área. Apesar das baixas eficiências desta tecnologia de módulo, este sofre menor influência das variações meteorológicas, além de que apresenta um custo menor do que os módulos de silício monocristalino e policristalino.

Como foi possível observar as eficiências de segunda lei foram para todos os módulos foram menores que 10%, o que representa um campo de grande melhoria, principalmente no que se refere a maior utilização da exergia solar disponível e da redução das perdas térmicas.

REFERÊNCIAS

- Chouder, A., Silvestre, S., Sadaoui, N., Rahmani, L., 2012. Modeling and simulation of a grid connected PV system based on the evaluation of main PV module parameters, *Simulation Modeling Practice and Theory*, vol. 20, pp. 46 – 58.
- Chouder, A., Silvestre, S., Taghezouit, B., Karatepe, E., 2013. Monitoring, modeling and simulation of PV systems using LabVIEW, *Solar Energy*, vol.91, pp. 337 – 349.
- Dincer, I., 2002. The role of exergy in energy policy making, *Energy Policy*, vol. 30, pp. 137–149.
- Dincer, I., Midilli, A., Hepbasli, A., Karakoc, T.H., 2010. *Global Warming: Engineering Solutions*, Springer New York Dordrecht Heidelberg, London.
- Joshi, A. S., Dincer, I., Reddy, B. V., 2009. Performance analysis of photovoltaic systems: A review, *Renewable and Sustainable Energy*, vol. 13, pp. 1884-1897.
- Kyocera, 2007. Disponível em:<www.kyocerasolar.com.br>. Acesso em 08 de nov. de 2013.
- Pandey, A. K., Tyagi, V.V., Tyagi, S. K., 2013. Exergetic analysis and parametric study of multi-crystalline solar photovoltaic system at a typical climatic zone, *Clean Techn Environ Policy*, vol. 15, pp. 333-343.
- Sahin, A.D., Dincer, I., Rosen, M.A., 2007. Thermodynamic analysis of solar photovoltaic cell systems. *Solar Energy Materials&Solar Cells*, vol. 91, pp. 153-159.
- Sarhaddi, F., Farahat, S., Ajam, H., Behzadmehr, A., 2010. Exergetic performance assessment of a solar photovoltaic thermal (PV/T) air collector. *Energy and Buildings*, vol. 42, pp. 2184–2199.
- Shell Solar, 2002. Disponível em:<www.shell.com/renewables>. Acesso em 08 de nov. de 2013.
- Xydis G, 2013. On the exergetic capacity factor of a wind - solar power generation system, *Journal of Cleaner Production*, vol. 47, pp.437-445.
- Green, M. A, Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W., Dunlop, E., 2012. Solar cell efficiency tables (version 39), *Progress in photovoltaics: Research and applications*, vol. 20, pp. 12 – 20.
- Uni-Solar, 2005. Disponível em:<www.uni-solar.com>. Acesso em 08 de nov. de 2013.

ENERGY AND EXERGY ANALYSIS PHOTOVOLTAIC GENERATOR

Abstract. *Photovoltaic systems are an energy generation technology that converts solar radiation into electricity. The concerns about using finite and renewable sources to electricity generation leded photovoltaic systems to be considered a promising technology to be inserted on brazilian electric network, considering the abundance of solar radiation in the Country territory. In this scenery, emerges the necessity to improves the knowledge about these systems, in order to identify the factors that influence the efficiency of this energy generation technology. The indexes that quantify the photovoltaic systems are important to identify losses and other issues related to system malfunctioning. Thus, in this paper a model to estimate the energetic and exergetic efficiencies is presented. The model is based on the location meteorological conditions and the electric and thermal parameters of the solar generator. Simulations were performed on monocrystalline, polycrystalline and amorphous silicon photovoltaic modules, considering the weather data of Belo Horizonte city, located at Minas Gerais state, Brazil. The results showed that the energy efficiencies ranged from 9.89% to 16.39% being the most efficient monocrystalline silicon module and the lower efficiency module amorphous silicon. The exergetic efficiency of monocrystalline and polycrystalline modules presented efficiencies very similar, 9.46 % and 9.84 % respectively, a difference explained by the difference in areas. Since the modulus of amorphous silicon presented exergetic efficiency of 3.15% and is therefore less efficient.*

Key words: *Photovoltaic Systems, Photovoltaic Modules, Energetic Analysis, Exergetic Analysis.*